

Travail de maturité 2013 - 2014



Imagerie en 3 dimensions
L'Holographie



Gymnase Auguste Piccard

Rédaction : Luca Mari
Classe : 3MS/3
Professeur : Vincent De Coulon

Lundi 28 octobre 2013





Table des matières

1 Histoire et introduction

L'être humain a toujours rêvé de voir des images en trois dimensions. Cette sensation de regarder un objet en relief mais de ne pas pouvoir le toucher, a toujours plu. Déjà en 1838, un certain Charles Wheatstone qui se trouvait au King's College à Londres, proposait une méthode basée sur la stéréoscopie qui permettait de découvrir des dessins en trois dimensions. Cette expérience avait été réalisée avant même que la photo n'ait été inventée. Le principe d'holographie, auquel nous allons nous intéresser, a été découvert par le physicien hongrois Dennis Gabor en 1947. Le mot "holographie" vient du grec *holos* qui veut dire *en entier* et de *graphein* qui signifie *écrire.* En effet, c'est une technique qui permet d'enregistrer toutes les informations d'un objet, que ce soit la forme, la distance ou le relief. Gabor avait dû revoir plusieurs fois sa méthode avant d'obtenir enfin un hologramme. Le principe pour enregistrer un hologramme ne requiert pas beaucoup de matériel. Il suffit d'avoir un objet, une source lumineuse avec certaines caractéristiques optiques, et un support pour enregistrer l'hologramme. Malheureusement pour lui, au début de ses expériences, il n'obtenait que des hologrammes de très mauvaise qualité, car il ne possédait pas encore le laser (1960) qui est essentiel pour la prise d'un hologramme correct. Pourquoi le laser est-il nécessaire ? Le principe de l'holographie requiert une source lumineuse dite cohérente (cf. théorie) délivrée par le laser.

De nos jours, on trouve des hologrammes un peu partout sans nous en rendre compte. On peut les retrouver sur les billets de banque, les appareils électroniques, des certificats, etc... Ils sont très utiles pour lutter contre la contrefaçon car ils sont difficiles à recopier.

Ce travail a été motivé par le besoin d'installer et de mettre en service une nouvelle installation d'holographie destinée aux travaux pratiques pour les étudiants en physique à l'EPFL. Le but était de tester le matériel, de définir les montages que les étudiants pourraient faire pendant leurs travaux pratiques d'optique et enfin d'écrire le mode d'emploi destiné aux étudiants.

2 Ondes

Les ondes emplissent notre vie quotidienne. Il est possible de voir une onde sur l'eau, autrement dit une vague ou une onde sur une corde tendue que l'on agite. De plus, il existe aussi des ondes que notre oeil ne peut pas voir comme les ondes sonores. En ce qui nous concerne, on s'intéressera plus particulièrement aux ondes lumineuses. Une onde est une perturbation qui se propage et qui oscille dans le temps et dans l'espace. On peut se placer à un endroit donné et observer comment un point oscille en fonction du temps, ou alors, on peut effectuer une photo de l'onde à un instant donné et on verra la forme de l'onde. Graphiquement, une onde peut être représentée comme une oscillation périodique dans le temps et dans l'espace (figure 1).

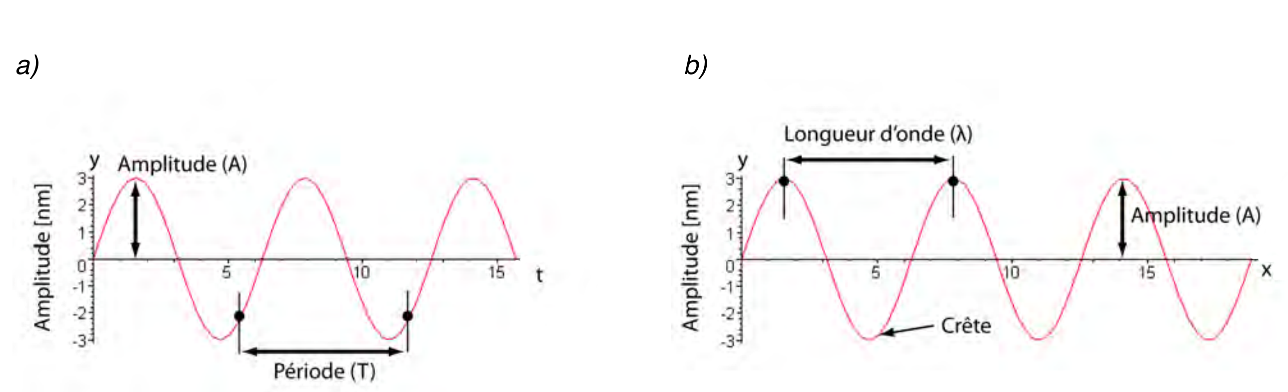


Fig. 1 Visualisation d'une onde sinusoïdale a) oscillation dans le temps b) propagation dans l'espace.

La longueur d'onde (λ) est la distance entre deux points situés entre le début et la fin d'une oscillation complète.
La période (T) est la durée d'une oscillation.
L'amplitude (A) représente la grandeur maximale mesurée depuis zéro de la variable qui oscille (onde sinusoïdale).
La fréquence (f) représente le nombre d'oscillations que l'onde effectue par unité de temps (la seconde). C'est donc l'inverse de la période : $f = \frac{1}{T}$. La fréquence se mesure en hertz se qui nous donne [Hz] de symbole.
La fréquence et la longueur d'onde sont toutes deux liées par la formule suivante : $\lambda f = c$. C'est le symbole de la vitesse de la lumière.

Toutes les ondes ne sont pas sinusoïdales. Un exemple d'onde non sinusoïdale est donné dans la figure 2.

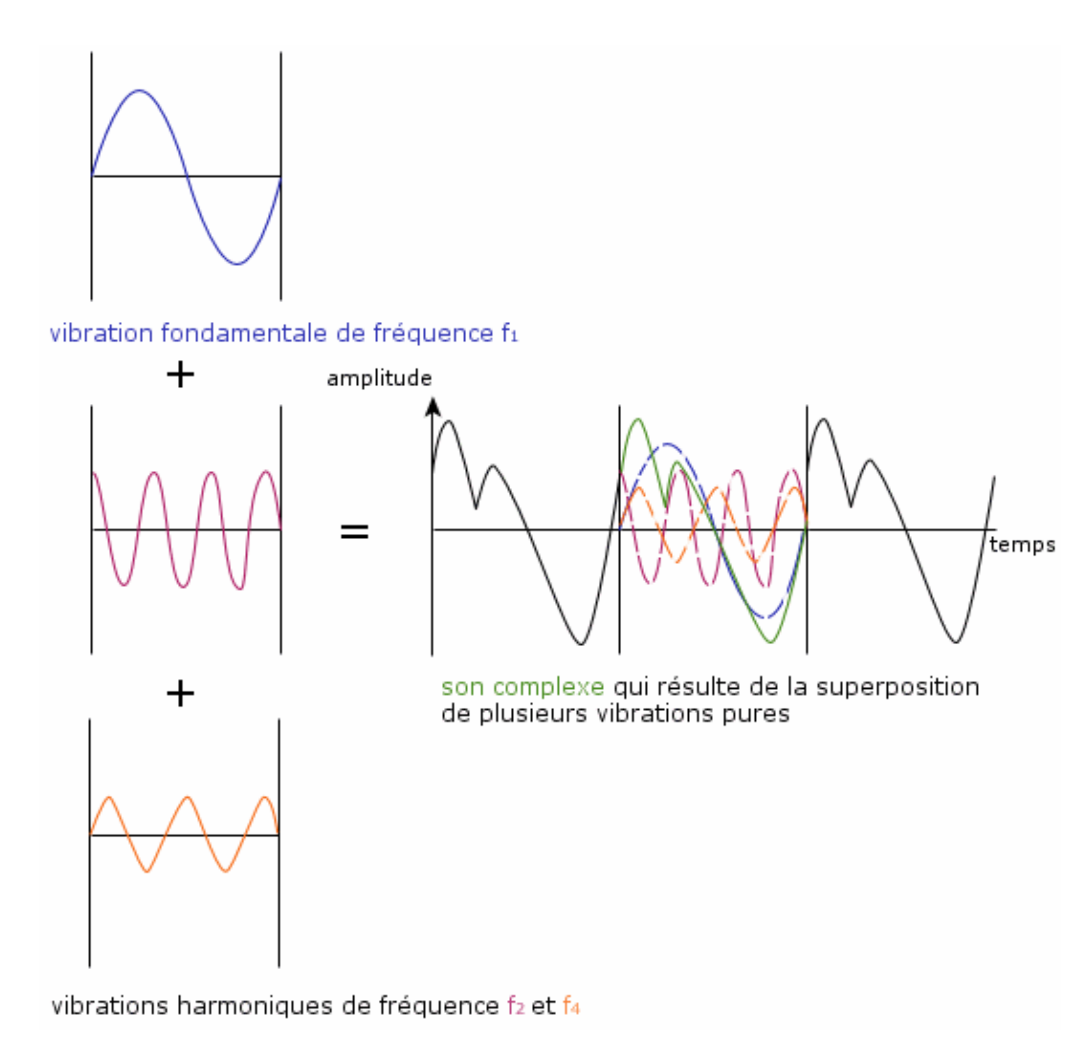


Fig. 2 Superposition d'ondes sinusoïdales donnant une onde non-sinusoïdale

On ne peut pas définir facilement une seule amplitude et une seule longueur d'onde sur l'onde en question. Une onde est une superposition d'ondes de fréquences bien définies. C'est pourquoi on la subdivise en plusieurs ondes sinusoïdales. En additionnant leur amplitude, on retrouve l'onde d'origine. Cela s'appelle le <u>principe de superposition</u> ou <u>interférence</u> d'ondes.

On a donc des interférences constructives lorsque les amplitudes s'additionnent (figure 3)

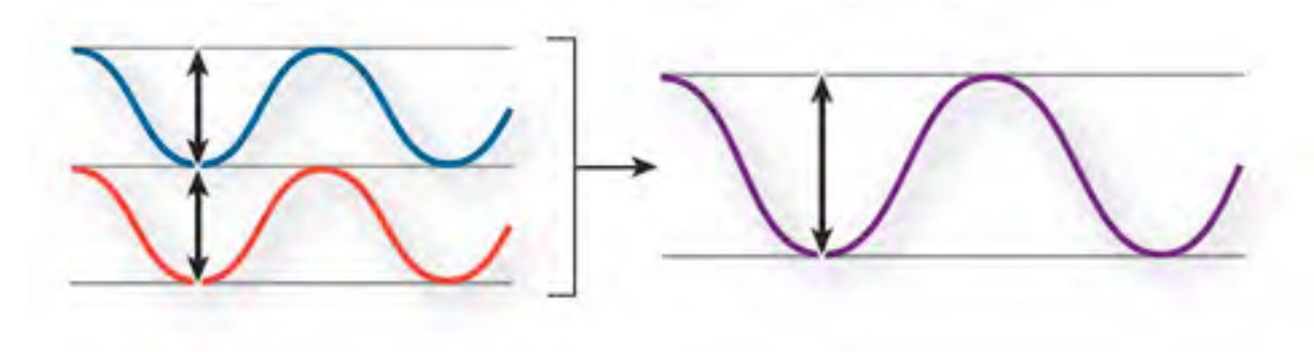


Fig. 3 Exemple d'interférences constructives

et des interférences destructives (figure 4) lorsque leur amplitude se soustrait.

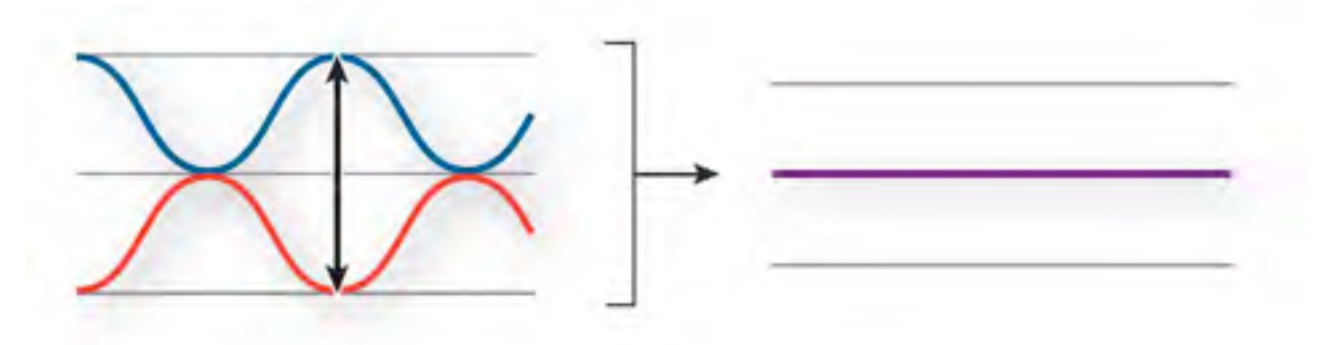


Fig. 4 Exemple d'interférences destructives (opposition de phase)

Sur la figure 3 on peut voir notamment deux ondes en phase. Cela signifie que les deux ondes ont été provoquées en même temps et qu'elles pulsent ensemble au même rythme. Parlons maintenant un peu de la cohérence de la lumière. Pour qu'une onde soit dite cohérente, il faut que les photons soient en phase et aient la même longueur d'onde, comme sur la figure 3. Cela va donner une lumière monochromatique car on n'aura qu'une seule fréquence. Chaque couleur est définie par une certaine fréquence. Pour faire un hologramme on a besoin d'une lumière cohérente car l'holographie est basée sur des interférences lumineuses. Le laser est une source de lumière cohérente facilement accessible de nos jours.

3 Le laser

Le mot laser vient de l'acronyme anglais : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation qui signifie en français Amplification de la Lumière par Émission Stimulée de Radiation. Le principe du laser a été mis au point en 1960. Une de ses principales caractéristiques est qu'il possède un temps de cohérence très grand. Il est calculé ainsi : $T_c = \frac{1}{\Delta\nu}$. $\Delta\nu$ représente la largeur de bande, c'est-à-dire l'étendu des fréquences de la lumière émise par le laser (figure 5). On parle d'un ordre de grandeur de $1.5 \cdot 10^9\ [Hz]$ de largeur de bande lorsqu'un laser He-Ne émet à $4.7 \cdot 10^{14} [Hz]$. On obtient donc une longueur de cohérence de 20 cm qui est à peu près la longueur du laser. Pour obtenir la longueur de cohérence, il suffit de multiplier le temps de cohérence par la vitesse de la lumière : $L_c = T_c c$.

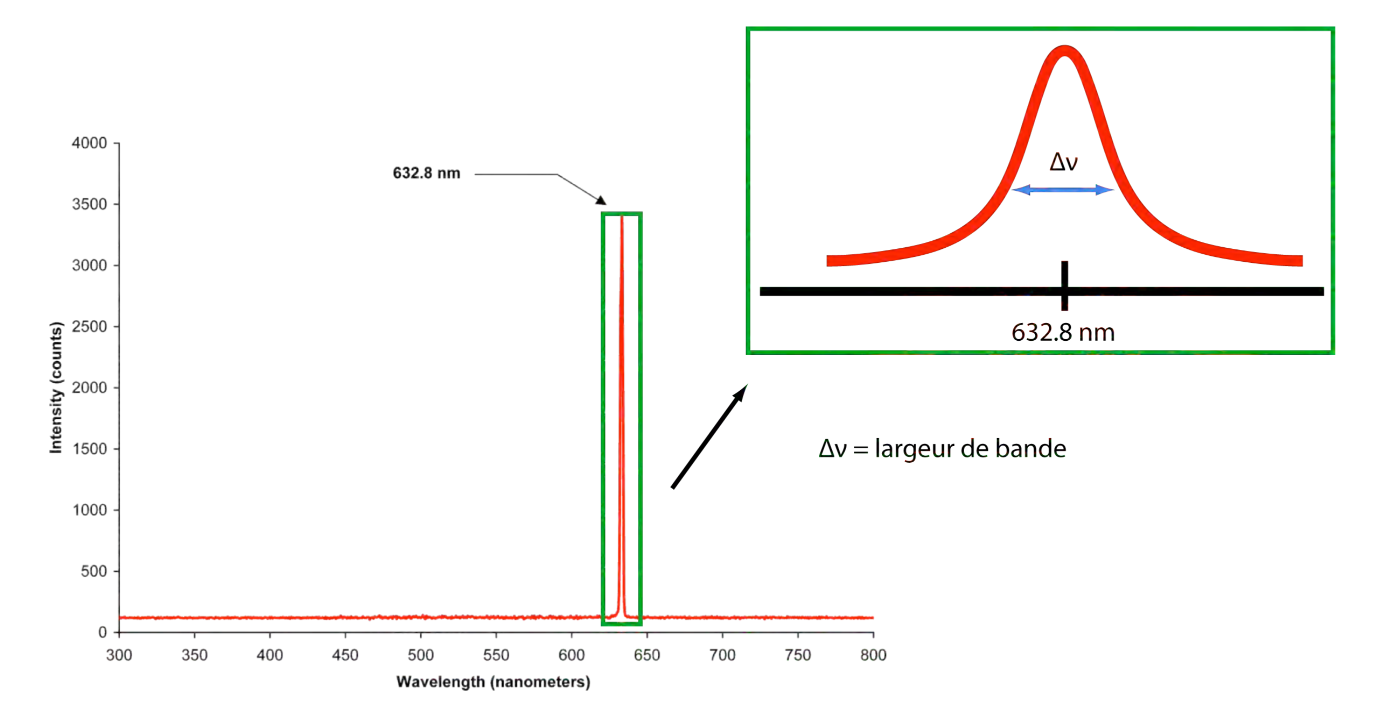


Fig. 5 Largeur de bande du laser

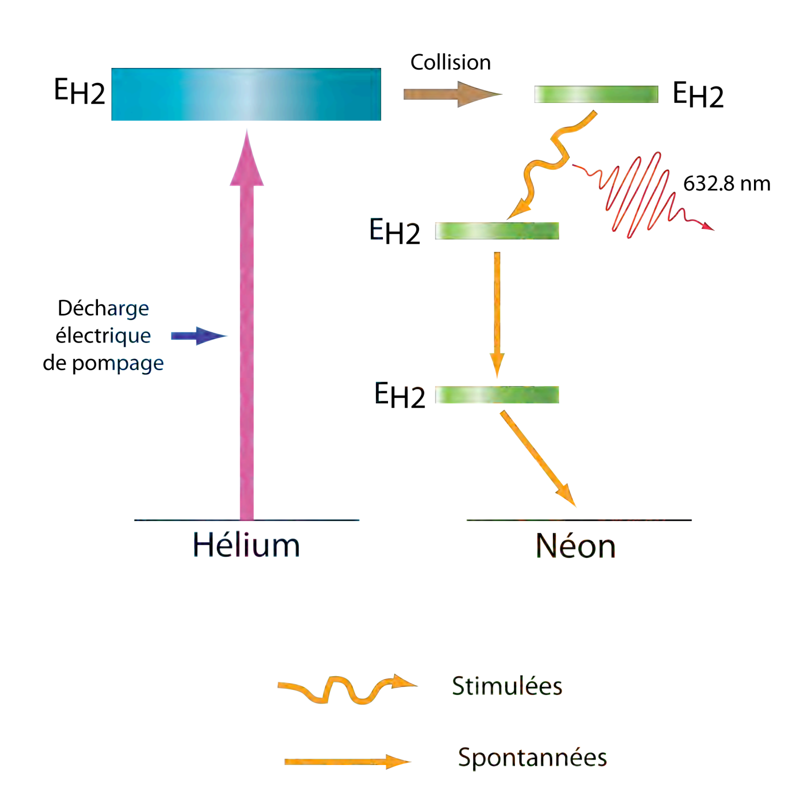


Fig. 6 Niveaux d'énergie d'un laser He-Ne

Le fonctionnement du laser est basé sur l'existence de niveaux d'énergie électroniques dans un atome (figure 6). Lorsque celui-ci n'est pas excité, les électrons sont dans un état dit *fondamental.* En bombardant l'atome d'électrons, certains électrons passent à un état d'énergie supérieur et l'atome s'excite. On appelle cela le *pompage optique.* La décharge électrique est obtenue au moyen d'une forte tension. Or, un atome ne peut pas garder cette énergie très longtemps et il va devoir la relâcher. Il y a deux façons de revenir à un état fondamental : la première est l'émission spontanée. L'atome se désexcite tout seul et émet un photon. La deuxième est l'émission stimulée. Un photon vient désexciter l'atome qui rejette alors un photon identique au premier.

On utilise ce principe avec un laser contenant le mélange de gaz He-Ne (hélium, néon). A l'aide d'une anode et d'une cathode, on crée une décharge électrique à l'intérieur du laser et les électrons bombardent les atomes d'hélium. Ces derniers vont acquérir de l'énergie et donc s'exciter (voir figure 6). Ils sont dans un état dit métastable: ils ne peuvent pas rester longtemps avec cette énergie. A chaque collision l'atome d'hélium rejoint son état fondamental en donnant son énergie à l'atome de néon. Ceci arrive car certains niveaux électroniques de l'hélium coïncident avec les niveaux électroniques excités du néon. A un moment donné, la plupart des atomes de néon sont excités, laissant leur état fondamental dépeuplé. Il va donc se produire un phénomène appelé *inversion de population*. Certains atomes commencent à se désexciter en émettant un photon (émission spontanée). Ces photons vont alors ramener les autres atomes environnant à leur état fondamental créant des émissions stimulées. Ainsi tous les photons émis ont la même fréquence. Ils sont gardés dans le tube à l'aide de deux miroirs. Le premier est réfléchissant à 100 %, l'autre est semi-transparent pour permettre aux photons de sortir dès que le rayon a atteint la puissance désirée. Cette intensité s'obtient grâce au fait qu'à chaque aller-retour, les photons vont stimuler l'émission d'autres atomes encore excités. Cette lumière est dite cohérente car les photons ont tous la même longueur d'onde et la même phase.

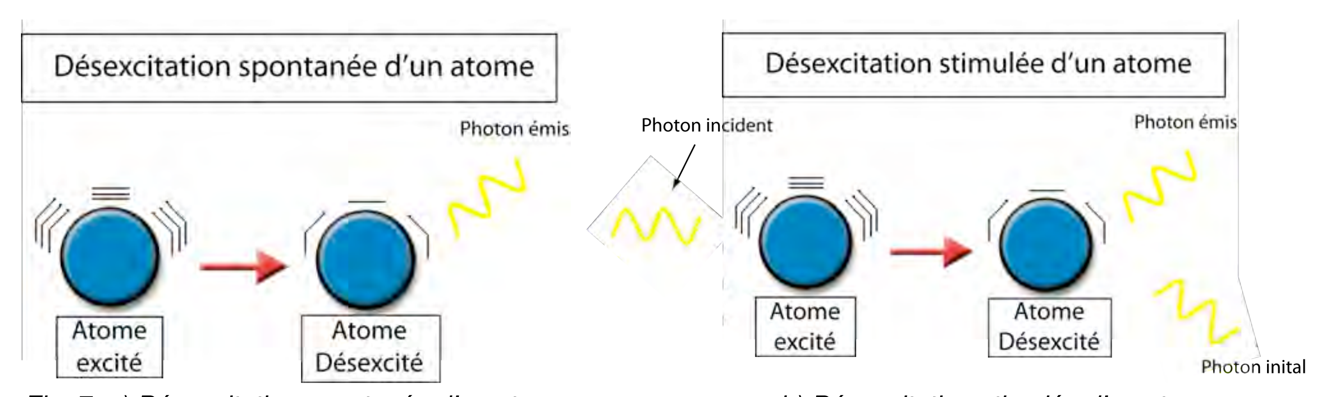


Fig. 7 a) Désexcitation spontanée d'un atome *b) Désexcitation stimulée d'un atome*

4 Diffraction

La diffraction est le principal phénomène qui permet de créer une image holographique. Il est visible lorsque de petites vagues sont créées à la surface de l'eau et qu'elles passent à travers une fente. Au début, on a un front très net et parallèle à la fente. Dès que la vague a passé la fente, des cercles sont obtenus. Pour que toute l'onde ait interféré lors de son passage à travers la fente, il faut que la largeur du trou soit plus petite que la longueur d'onde. Sinon les fronts d'onde n'auront pas de modifications, sauf sur les bords, et continueront leur route. Une fente crée donc des ondes circulaires. On a le même effet avec la lumière. Lorsqu'on la fait passer à travers une fente, on aura la création de fronts d'onde circulaires. Mais chaque zone de la fente va elle-même se comporter comme une source lumineuse. L'interférence entre les rayons issus de la fente vont créer une interférence comme celle de la figure 9 et créer des points lumineux. On aura au centre un point central très brillant, puis deux autres points autour de ce dernier, puis encore deux autres points, etc. La luminosité diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du faisceau





central qui est le seul à n'avoir subi aucune interférence. On obtient des interférences constructives, appelées maxima, ainsi que des interférences destructives, appelées minima (voir schéma).

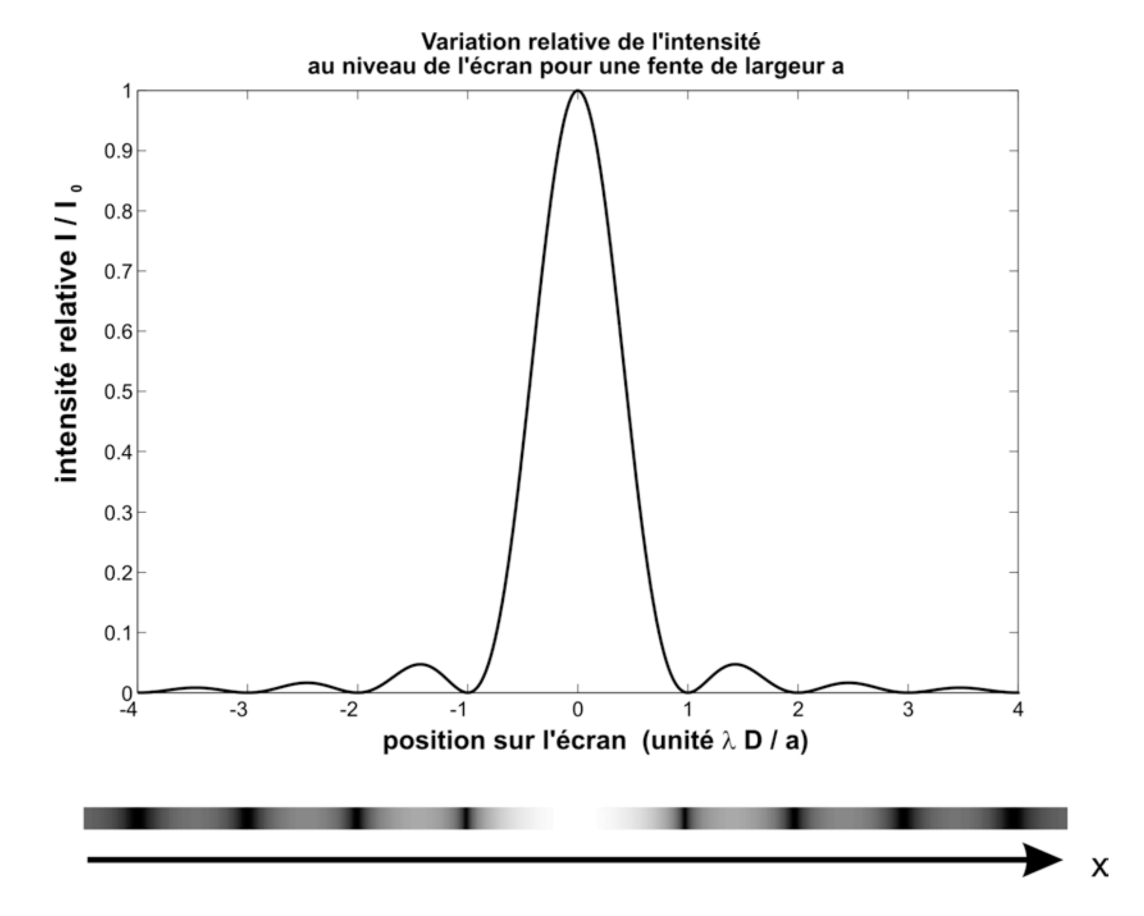


Fig. 8 Variation lumineuse pour une fente de largeur a

Un autre exemple d'interférence est celui provenant de deux fentes (figure 9). Chaque fente est une nouvelle source de lumière : s_1 et s_2. En un point P de la plaque photo, le rayon provenant de s_2 est déphasé de ΔL par rapport à celui provenant de s_1. Si $\Delta L = n\ \lambda$ alors on a une interférence constructive car il faut un multiple entier de la longueur d'onde pour que les ondes soit en phase. Si $\Delta L = \left(n + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda$ alors l'interférence est destructive car on est en opposition de phase.

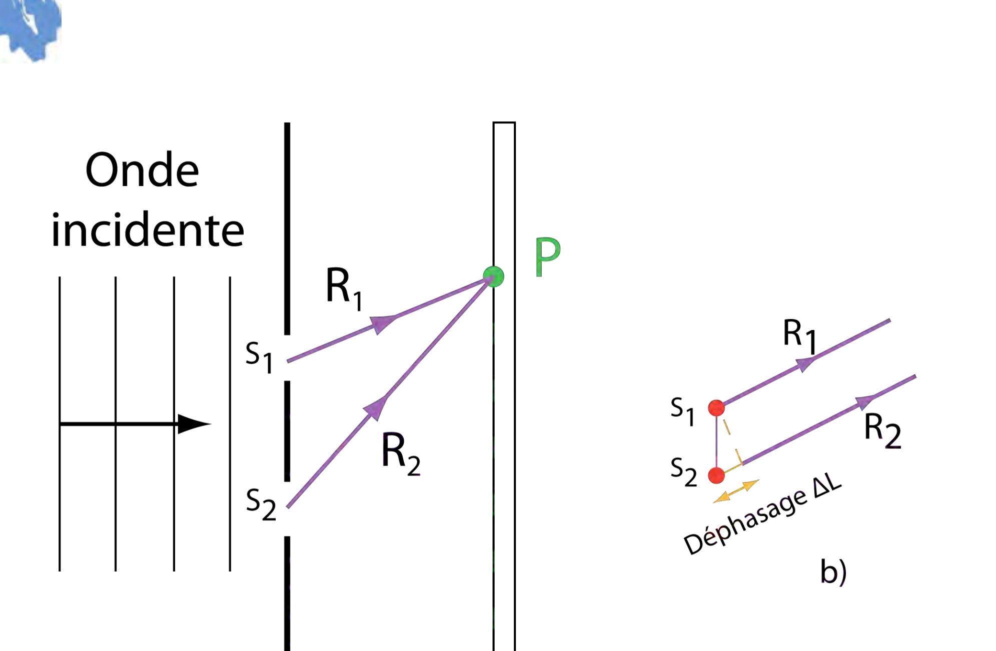


Fig. 9 Interférence d'une onde à travers deux fentes a)interférence b)déphasage de R_2 par rapport à R_1

Dans l'holographie, on forme un réseau de diffraction, c'est-à-dire qu'il n'y a pas qu'une seule fente mais plusieurs. La diffraction par un réseau est déterminée par la relation :

$$\sin\theta_n = \frac{n \cdot \lambda}{d}$$

où n représente l'ordre de diffraction et θ_n l'angle entre la normale au plan des fentes et la direction vers un point de la plaque. *d* désigne la distance entre les fentes. Lorsqu'on projette un rayon laser à travers un réseau de diffraction, on obtient le même résultat qu'avec une seule fente. On a un point central très lumineux puis des maximas alternés avec des minimas. Ces points lumineux n'interfèrent pas seulement à travers les fentes mais aussi entre eux.

5 L'holographie

L'holographie se base sur les effets des interférences lumineuses décrits auparavant. En effet, pour obtenir un hologramme, il faut deux faisceaux lumineux (figure 10). Le premier s'appelle faisceau objet. Il vient directement de l'objet que l'on veut photographier. C'est le même principe que pour les appareils photos qui utilisent la lumière ambiante ou un flash au lieu d'un laser (figure 11). Le deuxième s'appelle faisceau de référence. Il est envoyé sur la plaque photo, sans illuminer l'objet. C'est lui qui contient toutes les informations pour obtenir le relief d'une image. Il permet en quelque sorte de savoir à quelle distance se

trouve la plaque photo de l'objet. Une fois l'interférence enregistrée sur la plaque photo, on peut voir l'objet en éclairant la plaque photo avec un seul faisceau. Le faisceau de référence est utilisé pour cette reconstruction. La plaque photo possède des zones noires où la lumière ne passe pas, des zones grises où elle est atténuée et des zones claires où le faisceau passe sans être dévié. Ensuite, les rayons du faisceau de référence qui ont traversé la plaque vont interférer entre eux derrière la plaque et donner lieu à l'image que l'on voit avec nos yeux. Ce sont ces fentes (réseaux de diffraction) qui sont responsables de cette vision 3D (cf. diffraction).

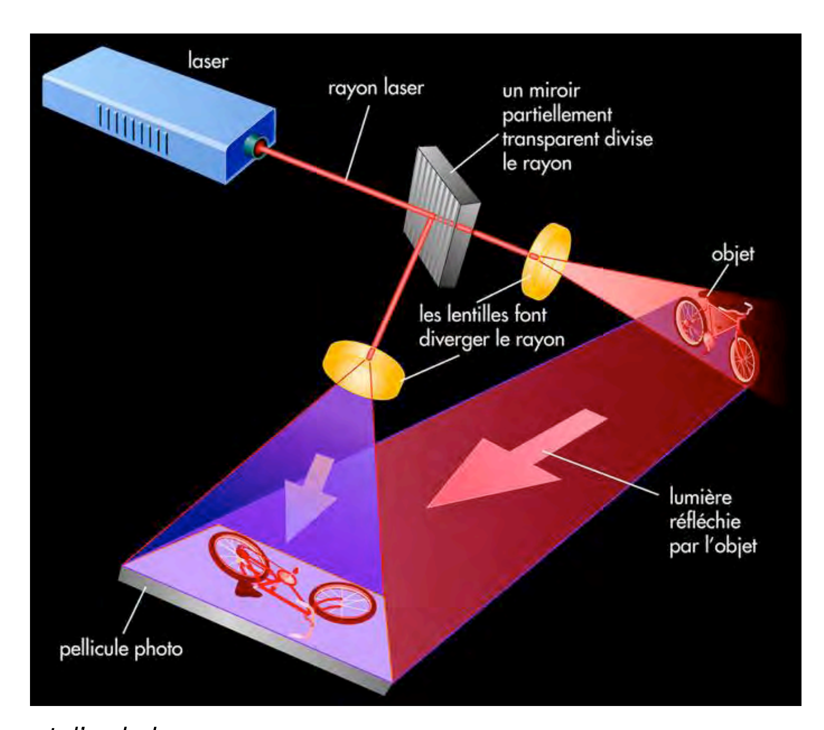


Fig. 10 Enregistrement d'un hologramme

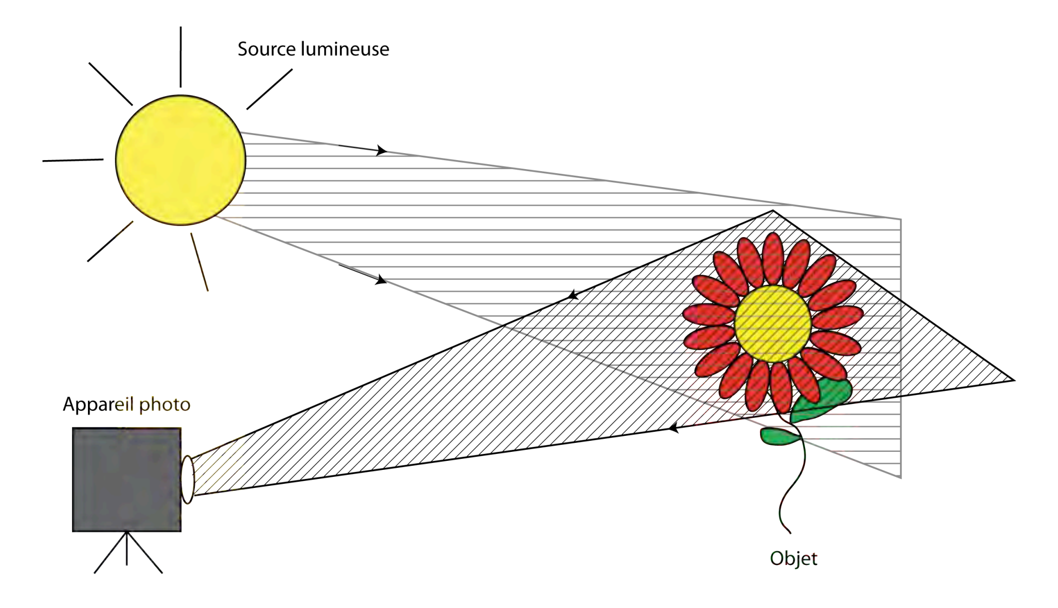


Fig. 11 Schéma de la capture d'une photo

Pour faire un hologramme, il est nécessaire d'enregistrer une image sur une plaque photo. Celle-ci est dotée d'une émulsion photosensible constituée de petits grains d'argent qui sont invisibles à l'oeil nu. Afin de développer la photo, il faut s'isoler dans une pièce munie d'une lampe rouge ou verte car la plaque est toujours sensible à la lumière et la moindre source lumineuse pourrait détruire la photo. La première étape du développement consiste à tremper la plaque dans un bain contenant une substance qui va révéler la photo. Elle noircit les grains d'argent qui ont été illuminés par la lumière. Ensuite, il faut tremper la plaque photo dans un autre bain qui arrête le révélateur sinon la photo deviendrait toute noire. Pour finir, il suffit de rincer la plaque sous l'eau et la faire sécher. Ce système a été mis au point en 1835 par Louis Daguerre qui était décorateur en France, mais le procédé a été amélioré jusqu'en 2006, année durant laquelle la plupart des industries ont abandonné la pellicule face au numérique.

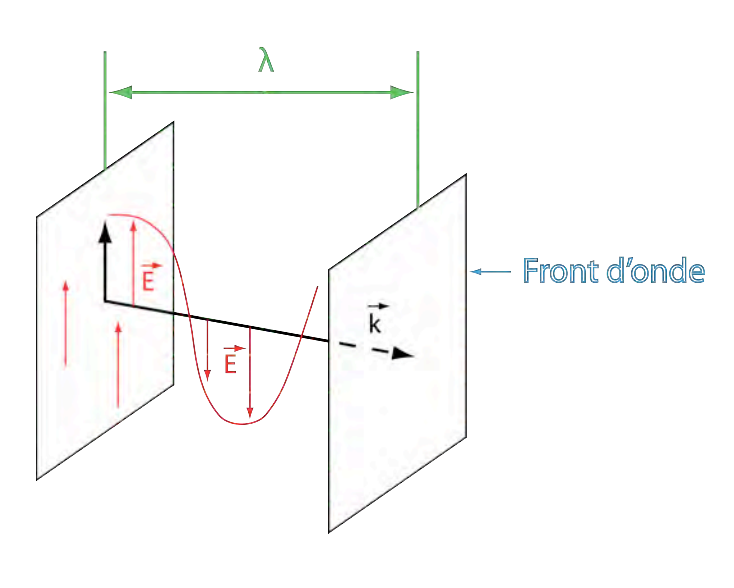
6 Théorie

6.1 Ondes planes

Une onde plane monochromatique $A\,(\vec{r},t)$ se propage dans la direction du vecteur d'onde $\vec{k}$ selon la formule :

$$A\,(\vec{r},t) = E_0 \cos(\vec{k}\cdot\vec{r} - \omega t + \phi) \quad \text{avec } k = \frac{2\pi}{\lambda}\ ,\ \omega = \frac{2\pi}{T} \ \text{ et } \ \Phi = \textit{décalage de l'onde}$$

E_0 représente l'amplitude maximale de l'onde.



Un front d'onde est constitué par des plans perpendiculaires à $\vec{k}$ (figure 12). En effet, tout point défini par un vecteur $\vec{r}$ partant de l'origine *O* et appartenant au plan, donne une projection constante sur la droite de vecteur directeur $\vec{k}$.

Fig. 12 Front d'onde

En notation complexe (très pratique pour la suite):

$$A\,(\vec{r},t)=\frac{1}{2}\left(E(\vec{r},t)+E(\vec{r},t)^{*}\right)\quad \text{avec}\quad E(\vec{r},t)=E_0\exp[i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t+\phi)]$$

6.2 Intensité

L'énergie absorbée par la plaque photographique durant un certain temps d'observation τ (grand par rapport à la période T) est proportionnelle à la moyenne sur τ du carré de l'amplitude de l'onde :

$$\frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} A(\vec{r},t)^2\,dt=\frac{1}{4\tau}\int_0^{\tau}\left(E(\vec{r})^2 e^{-2i\omega t}+2E(\vec{r})E(\vec{r})^{*}+E(\vec{r})^{*2}e^{2i\omega t}\right)dt=\frac{1}{2}E(\vec{r})E(\vec{r})^{*}$$

On s'aperçoit que l'intégrale du premier et du troisième terme tendent vers 0 car $\tau >> T$.
On appelle intensité de l'onde (notée $I(\vec{r})$) la formule suivante:

$$I(\vec{r})=E(\vec{r})E(\vec{r})^{*}$$

Par la suite, lorsqu'on écrit E , on sous-entend $E(\vec{r})$ car t n'intervient plus. Sur la plaque photo, le taux de transmission d'une onde diminue avec le temps d'exposition τ . Après le développement, la plaque se comportera comme un réseau de diffraction dont la structure suit l'intensité $I(\vec{r})$. Désignons par η le taux de transmission de la plaque (après le développement). Dans certaines situations, ce taux s'écrit

$$\eta(\vec{r})=\alpha-\beta\,\tau\,I(\vec{r})$$

α et β sont des constantes positives.

6.3 Superposition

Une onde de référence $E_R(\vec{r})$ et une onde provenant d'un point *P* de l'objet $E_P(\vec{r})$ se superposent en un point $\vec{r}$ de la plaque.

$$E_R(\vec{r})=E_{R0}\exp[i(\vec{k}_1\cdot\vec{r}+\psi]\qquad \text{et}\qquad E_P(\vec{r})=E_{P0}\exp[i(\vec{k}_2\cdot\vec{r}+\phi]$$

k_1 et k_2 sont les vecteurs d'onde des ondes de références provenant de *P* respectivement.

Naturellement, $k_1=k_2\equiv k=\dfrac{2\pi}{\lambda}$ (pas de changement de longueur d'onde après réflexion sur l'objet). L'intensité au niveau de la plaque est donnée par:

$$I=(E_R+E_P)(E_R^{*}+E_P^{*})=I_R+I_P+E_RE_P^{*}+E_PE_R^{*}$$

Après le développement de la plaque, on replace cette dernière au même endroit, on enlève l'objet et on enclenche le faisceau de référence (dont l'onde est E_R). Une onde transmise (notée *E*) et appelée onde de reconstruction, a pour expression (juste derrière la plaque):

$$E = \eta E_R = (\alpha - \beta\,\tau\, I)E_R = \eta_0 E_R - \beta\,\tau\, E_R^2 E_P^* \; - \beta\,\tau \left|E_R\right|^2 E_P$$

où l'on a défini $\eta_0 = \alpha - \beta\tau(I_R + I_P)$.

Rappel : $\left|E_R\right|^2 \in \Re$ est le carré du module de E_R , soit $\left|E_R\right|^2 = E_R E_R^*$.

Les trois termes obtenus composent l'amplitude de l'onde *E* juste derrière la plaque. On va se placer dans les conditions où l'on peut faire l'approximation que l'onde émergente (derrière la plaque) peut être construite comme une superposition de 3 ondes planes (de directions différentes), chacune caractérisée par l'un des 3 termes. Pour simplifier la discussion, on place la plaque dans le plan *Oxy* et les 2 vecteurs d'onde $\vec{k}_1$ et $\vec{k}_2$ sont situés dans le plan *Oxz* (figure 13).

$$\vec{k}_1 = (-k\sin\theta_1, 0, k\cos\theta_1) \qquad \vec{k}_2 = (k\sin\theta_2, 0, k\cos\theta_2)$$

θ_1 et θ_2 sont compris entre 0 et $\dfrac{\pi}{2}$.

Considérons un point de la plaque défini par $\vec{r} = (x,0,0)$.

Le <u>premier terme</u> $(\eta_0 E_R)$ a pour phase :

$$\exp[i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}] = \exp[-ikx\sin\theta_1]$$

Il va donner lieu à une onde (plane) qui se propage dans la direction $\vec{k}_1$. Il s'agit de l'ordre zéro de diffraction (il ne contient pas d'information sur l'objet). Cette onde a la direction de l'onde de référence.

Le <u>deuxième terme</u> $(-\beta\tau E_R^2 E_P^*)$ a pour phase l'expression :

$$\left(\exp[i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}]\right)^2 \exp[-i\vec{k}_2 \cdot \vec{r}] = \exp[i(2\vec{k}_1 - \vec{k}_2)\cdot\vec{r}] = \exp[-ikx(2\sin\theta_1 + \sin\theta_2)]$$

Pour que l'on puisse construire une onde plane associée (de longueur d'onde λ toujours), il faut trouver un angle θ_3 tel que $\sin\theta_3 = 2\sin\theta_1 + \sin\theta_2$. Dans la situation expérimentale où θ_1 et θ_2 sont très petits, $\sin\theta \simeq \theta$ et donc :

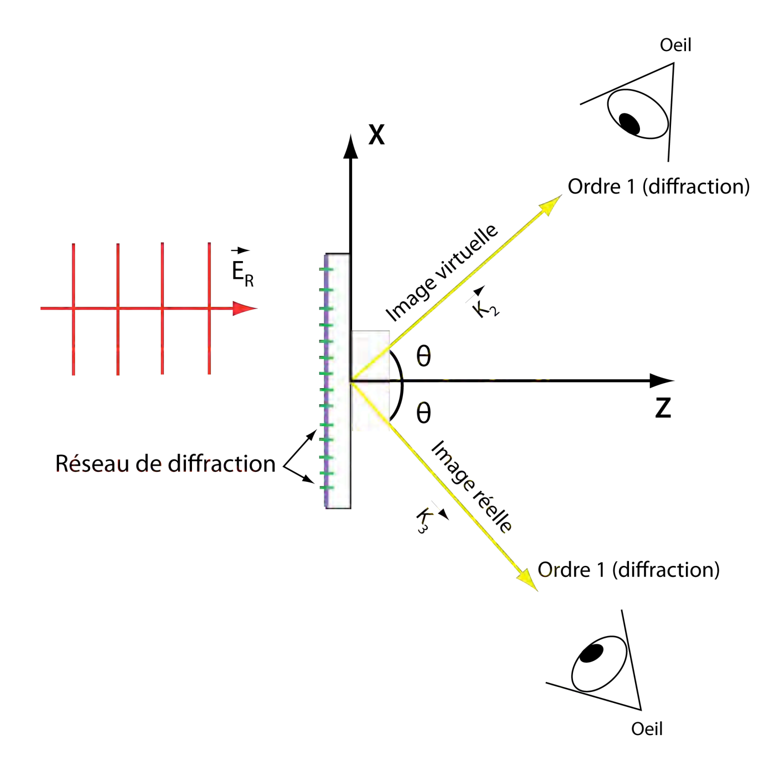
$$\theta_3 \simeq 2\theta_1 + \theta_2$$

Le vecteur d'onde de cette onde est par conséquent $\vec{k}_3 = (-k\sin\theta_3, 0, k\cos\theta_3)$.

Le <u>troisième terme</u> $(\beta\tau\left|E_R\right|^2 E_P)$ a pour phase :

$$\exp\left[i\vec{k}_2 \cdot \vec{r}\right] = \exp\left[ikx\sin\theta_2\right]$$

L'onde plane associée ressort dans la direction $\vec{k}_2$, soit dans la même direction que l'onde émise par le point de l'objet considéré.



La 2ème onde donne une image dite réelle de l'objet. La 3ème onde donne une image dite virtuelle de l'objet. Ces deux ondes correspondent au premier ordre de diffraction. Par rapport à la direction définie par l'onde de référence, les directions de ces ondes sont symétriques. Les images qu'elles renvoient forment un angle égal à $\theta_1 + \theta_2$ de part et d'autre de la direction de l'onde de référence (qui est $\vec{k}_1$).

Prenons le cas particulier où $\theta_1 = 0$ (figure 13). Ainsi, lors de la reconstruction de l'hologramme l'onde de référence arrive perpendiculairement au plan de l'hologramme et $\theta_2 = \theta_3 = \theta$.

Fig. 13 Reconstruction d'un hologramme à partir du faisceau de référence E_R

Une autre manière de visualiser ce qui se passe est donnée dans la figure 14 :

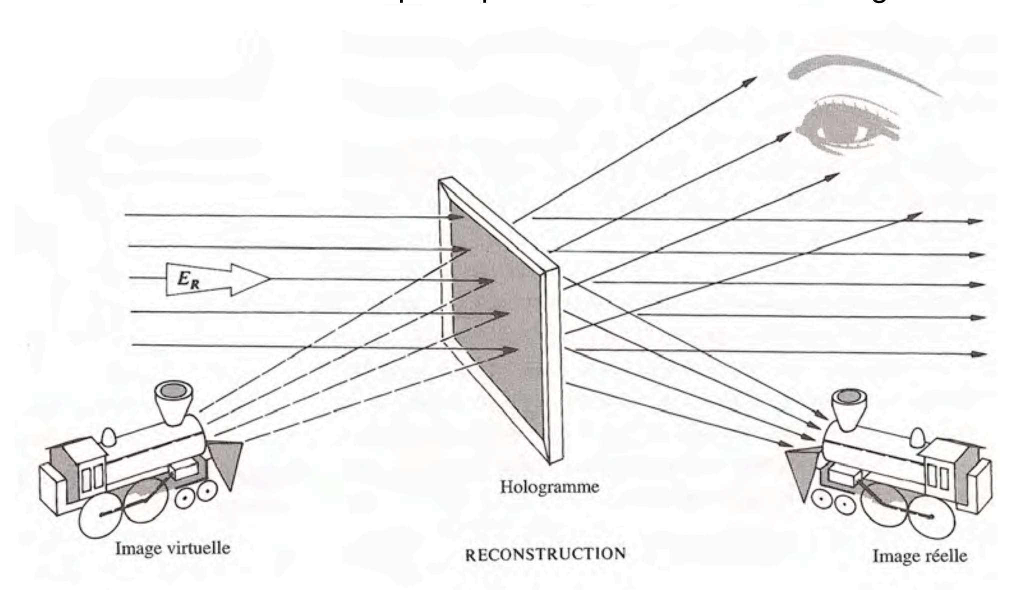


Fig. 14 Formation d'une image réelle et d'une image virtuelle quand le faisceau de référence E_R illumine la plaque holographique

7 Mode d'emploi pour faire un hologramme

7.1 Mode d'emploi pour préparer les produits chimiques nécessaires pour faire un hologramme

***Attention* : il est vivement conseillé de mettre des gants pour toutes les manipulations suivantes.**

1) Révélateur
Mélanger 100 ml de développeur holographique avec 400 ml d'eau déionisée. Continuer jusqu'à ce que la solution devienne transparente. Mettre le tout dans le récipient marqué "Developer". ***Attention* : cette solution fait beaucoup de tâches blanches. Eviter le contact avec des habits sombres.**

2) Bain d'arrêt
Mélanger 12 ml de solution bain d'arrêt (stop-bath) avec 468 ml d'eau déionisée. Mettre le tout dans le récipient marqué "Stop-bath".

3) Agent blanchissant
Dissoudre 5 g de bichromate de potassium avec 1000 ml d'eau déionisée. Ajoutez 5 ml d'acide sulfurique concentré. ***Attention* : il est fortement conseillé de faire ce mélange sous la hotte. Le produit est toxique.** Mettre le tout dans le récipient marqué "Bleaching".

4) Rinçage
Vous pouvez mettre dans un quatrième récipient de l'eau déionisée qui vous servira à rincer l'hologramme. Mais vous pouvez aussi rincer tout simplement votre hologramme avec l'eau du robinet.

7.2 Mode d'emploi pour préparer l'appareillage qui permet de faire un hologramme par transmission

***Attention* : il faut absolument éviter de regarder directement le rayon laser. Le danger de perdre complètement ou partiellement la vue est réel.**

***Attention* : il est vivement recommandé de mettre des gants pour les manipulations suivantes, notamment pour éviter les traces de doigts sur les miroirs.**

***Attention* : veuillez enlever tout objet sur vous pouvant réfléchir le rayon laser (montre, bracelet, collier, ...)**

***Attention* : Il faut toujours garder à l'esprit où se trouve le rayon laser autour de vous. Vous pourriez le recevoir dans les yeux.**



On commence par aligner le laser en utilisant la technique de l'auto-suicide, autrement dit le laser doit se tirer dans l'oeil. Pour cela, il faut placer le laser sur les supports prévus à cet effet et placer le beam splitter juste devant (figure 15). On a utilisé le beam splitter à la place d'un miroir car il est difficile de savoir si le miroir est vertical. Du coup, le rayon ne se réfléchira pas horizontalement. Ensuite, il faut régler les vis de fixation du laser de façon à ce que le rayon laser retourne par le trou d'où il sort (figure 16). Une autre manière de faire serait d'aligner horizontalement le laser avec un niveau à bulle. Ensuite, on peut aligner les miroirs selon la référence du laser et ainsi obtenir un système parfaitement horizontal. Une fois cette procédure terminée (voir figure 17), on commence par placer le premier miroir (M_1), qui se situe devant le laser et le système optique (E25x). Il doit être positionné avec les grands "pinholes" (disques noirs avec un trou d'environ 2 mm). Positionnez-les de façon à ce que le rayon laser passe parfaitement par les deux trous. Il faut éviter d'avoir des reflets sur les bords des trous car on perd l'intensité du faisceau. Ensuite, positionner le beam splitter (BS), le miroir (M_3), le miroir (M_2) et le support pour la plaque photo (H). Arranger le miroir (M_2) de façon à avoir le faisceau au centre du grand miroir (M_3). Arranger le grand miroir (M_3) pour avoir le faisceau au centre de la plaque photo. On passe au système optique. Enlevez les deux disques noirs et remplacez-les par l'objectif (E25x) et le pinhole (trou de 30 µm). Pour l'objectif il faut placer une bague noire sur laquelle l'objectif sera vissé. Placez-la du coté prévu à cet effet (figure 18). Vissez-la avec une clé imbus. Même technique pour le pinhole, vissez-le du coté prévu à cet effet à l'aide d'une clé imbus. Rapprochez le pinhole et l'objectif à l'aide de la molette (c_3) à environ 3 mm de distance l'un et de l'autre. Alignez le pinhole ou l'objectif à l'aide des petites molettes (c_1 et c_2) de façon à avoir une intensité de faisceau maximale. Rapprochez ou éloignez l'objectif du pinhole à l'aide de la molette (c_3) pour avoir le moins possible de franges d'interférences et obtenir un point lumineux (figure 19). Utilisez une feuille blanche pour cette étape. Placez la statue vers la plaque photo (figure 17) et alignez le beam splitter pour avoir toute la statue éclairée. Contrôlez que vos faisceaux soient toujours au centre de chaque miroir et que la plaque photo soit entièrement éclairée par le laser. Utilisez une plaque photo fictive pour tous vos réglages. Contrôlez la propreté des miroirs, cela pourrait influencer la lumière réfléchie. Il est préférable pour cette expérience d'avoir l'émulsion de la plaque photo du côté de la statue (figure 17, côté noirci). Vous pouvez placer le shutter (SH) entre le miroir (M1) et le système optique. Maintenant vous êtes prêt pour faire votre hologramme.



Fig. 15 Montage laser

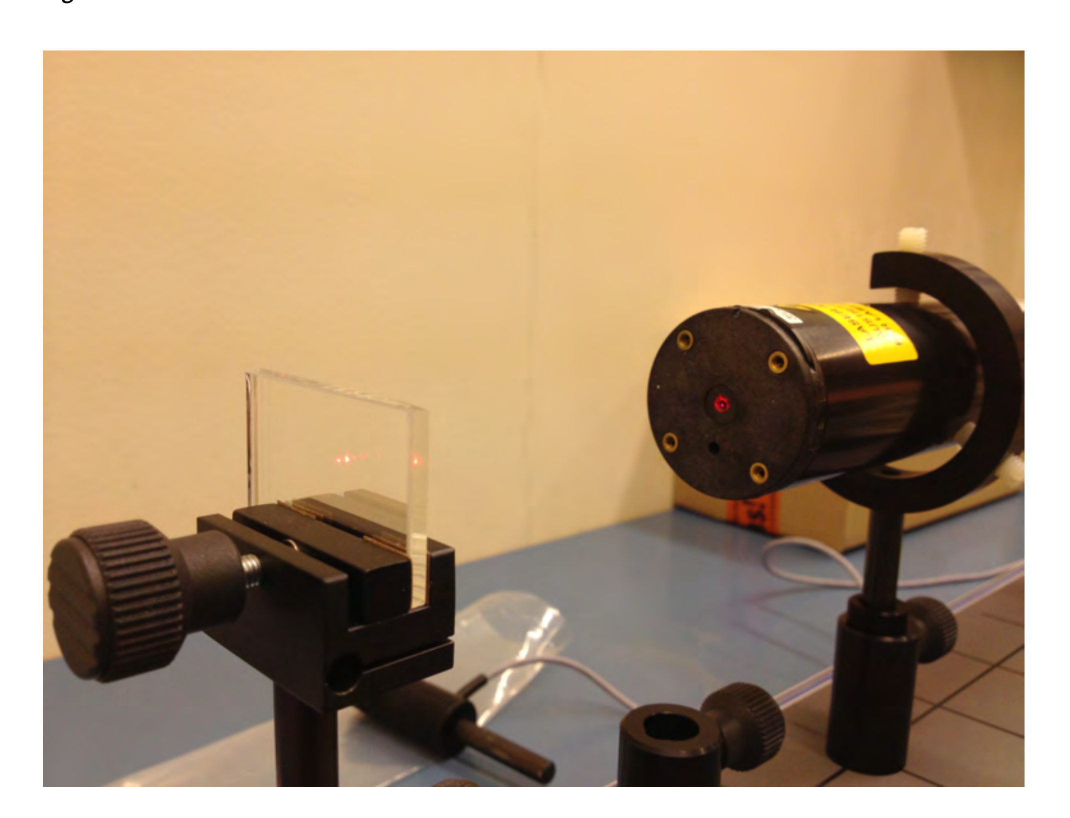


Fig. 16 Alignement laser

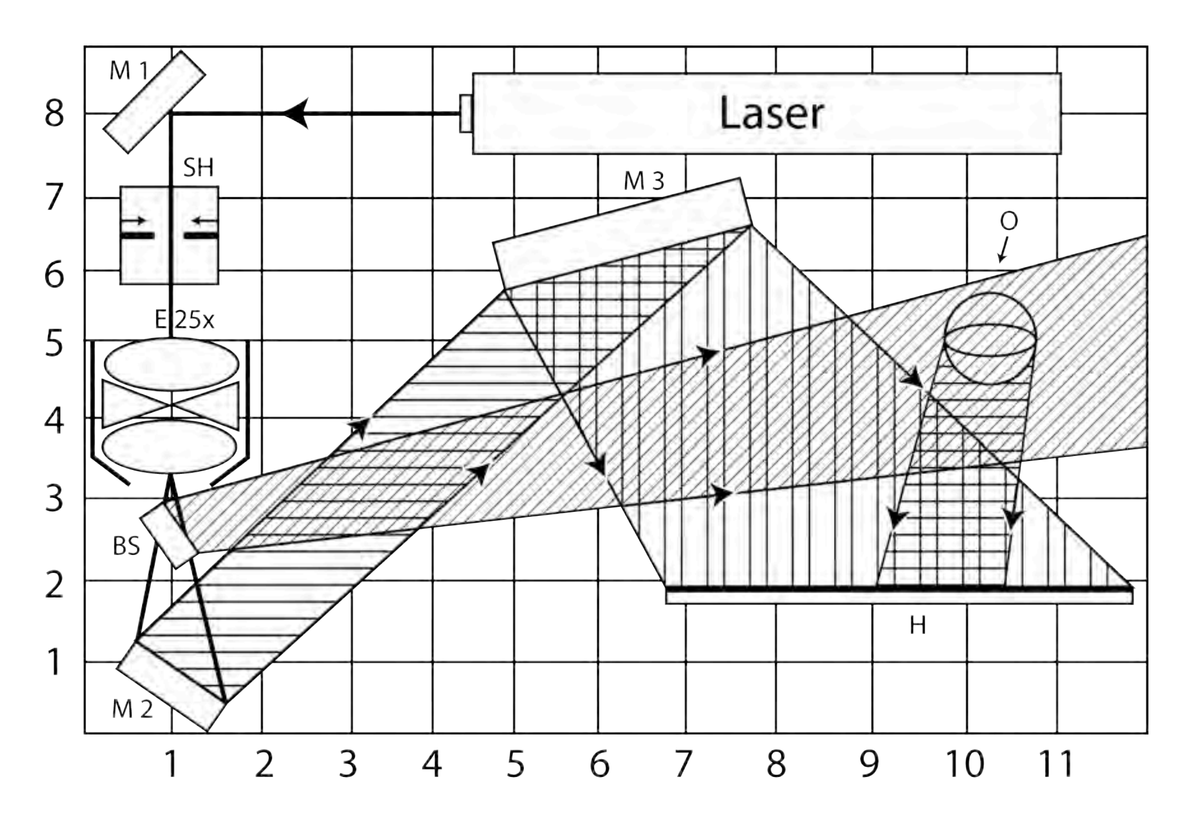


Fig. 17 Montage pour faire un hologramme standard

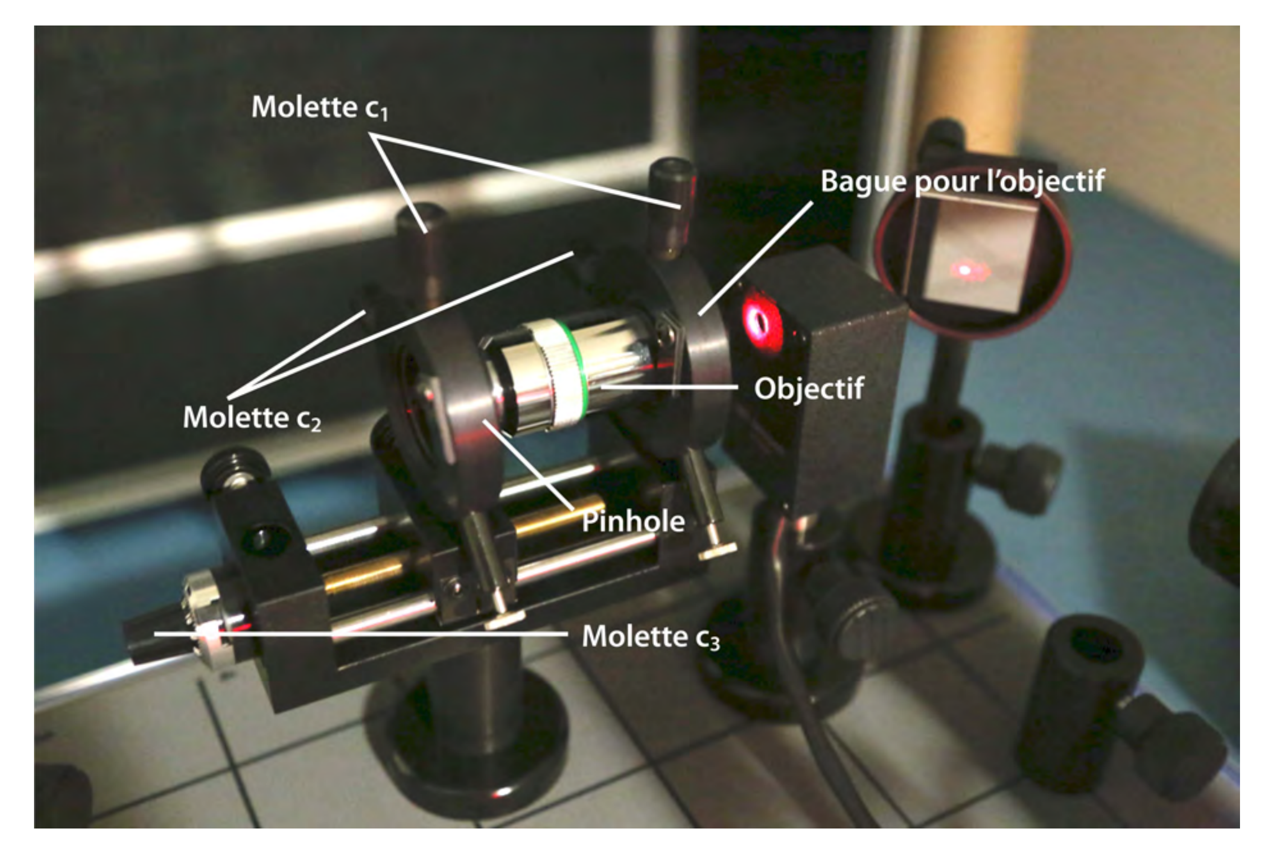
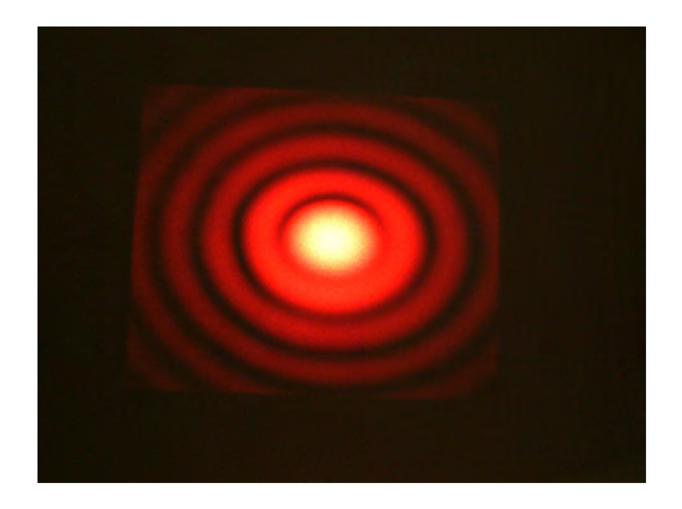


Fig. 18 Description système optique


Filtre spatial (pinhole) mal réglé

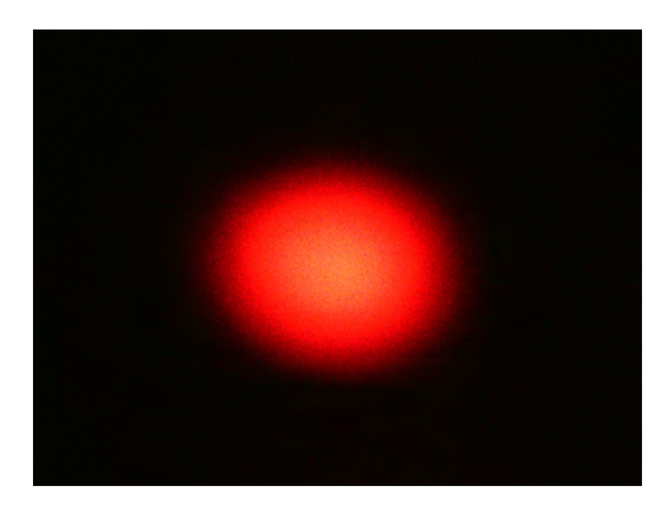

Filtre spatial correctement réglé

Fig. 19 Réglage optique

7.3 Mode d'emploi pour faire un hologramme standard (par transmission)*

*Cet hologramme est visible seulement à l'aide d'une source lumineuse de même longueur d'onde que celle qui a servi à l'enregistrer.

Attention **:** **<u>il est nécessaire d'utiliser uniquement une lumière verte pendant cette expérience.</u> Les téléphones portables doivent rester éteints pour ne pas illuminer la pièce. Les plaques photos sont très sensibles à la lumière**

Attention **: rester immobile, loin de la table d'expérience ou du mobilier environnant pendant le temps d'exposition. La moindre vibration peut détruire l'hologramme.**

Attention **: refermer immédiatement après utilisation la boîte contenant les plaques photos vierges.**

Eteignez toutes les lumières et allumez une lampe verte. Commencez par mettre la plaque photo neuve sur son support. Eloignez-vous de la table et activez l'expérience à l'aide du shutter. Fixez un temps d'exposition d'environ 9 s. Prenez la plaque contenant l'hologramme et mettez-la dans le premier bain (révélateur) pendant 2 min. Ensuite reprenez votre plaque et mettez-la dans le deuxième bain (bain d'arrêt) pendant 30 s. Vous pouvez maintenant rallumer la lumière et rincer votre photo avec de l'eau deionisée ou l'eau du robinet. Si votre plaque est tellement foncée que la lumière a du mal à passer à travers, vous pouvez la plonger dans le bleaching. ***Attention*****, cette solution a un effet très violent sur la plaque photo. Plongez votre hologramme pendant 5 s au maximum et rincer immédiatement sous l'eau du robinet.** Si la plaque photo est exposée trop longtemps à ce produit, votre hologramme sera effacé. Pour sécher votre plaque, il est conseillé d'utiliser de l'air comprimé.

7.4 Visualisation d’un hologramme standard (par transmission)

Pour visualiser votre hologramme, il vous suffira de remettre votre plaque photo sur le même montage (figure 17), dans le même sens que pour l’enregistrement et d’enlever le beam splitter et la statue. Si vous tournez votre plaque photo de 180° autour d’un axe vertical vous verrez votre hologramme sortir de la plaque photo. Il faut vous positionner à deux mètres de la plaque photo pour voir l’hologramme. Si vous tournez votre plaque photo de 180° autour d’un axe horizontal perpendiculaire à la plaque, vous verrez votre hologramme à l’envers.
Vous pouvez aussi voir votre hologramme en utilisant une source lumineuse blanche intense tel que le flash de votre téléphone portable. En positionnant le flash derrière la plaque photo, vous verrez votre figure composée avec les couleurs de l’arc-en-ciel. En effet, un flash blanc possède plusieurs longueurs d’ondes différentes.

7.5 Mode d’emploi pour faire un hologramme par réflexion*

*Cet hologramme est visible en lumière naturelle.

Il faut faire le même montage que pour un hologramme standard, sauf qu’il faut enlever le beam splitter (figure 20). Pour cette expérience, il faut positionner correctement l’émulsion de la plaque photo. Pour cela il faut prendre des gants et faire glisser ses doigts sur un coin de la plaque. Il y aura un coté lisse et l’autre sera collant. C’est cette surface collante qui nous intéresse. Il faut la placer du côté de la statue (figure 20). La statue doit être proche de la plaque photo sans toutefois la toucher et elle doit être placée latéralement. Une partie du rayon doit pouvoir continuer son chemin sans être réfléchi par la statue (figure 20). Le temps d’exposition est d’environ 4 s. Pour le développement, suivez les instructions pour faire un hologramme par transmission. *Attention* : Il faut que la statue soit proche de la plaque photo (2 cm maximum). En effet, si la statue est trop loin de la plaque photo, il y aura un problème d’équilibre entre l'intensité lumineuse réfléchie par la statue et celle du faisceau transmis. Donc, l’interférence ne se produira pas correctement.





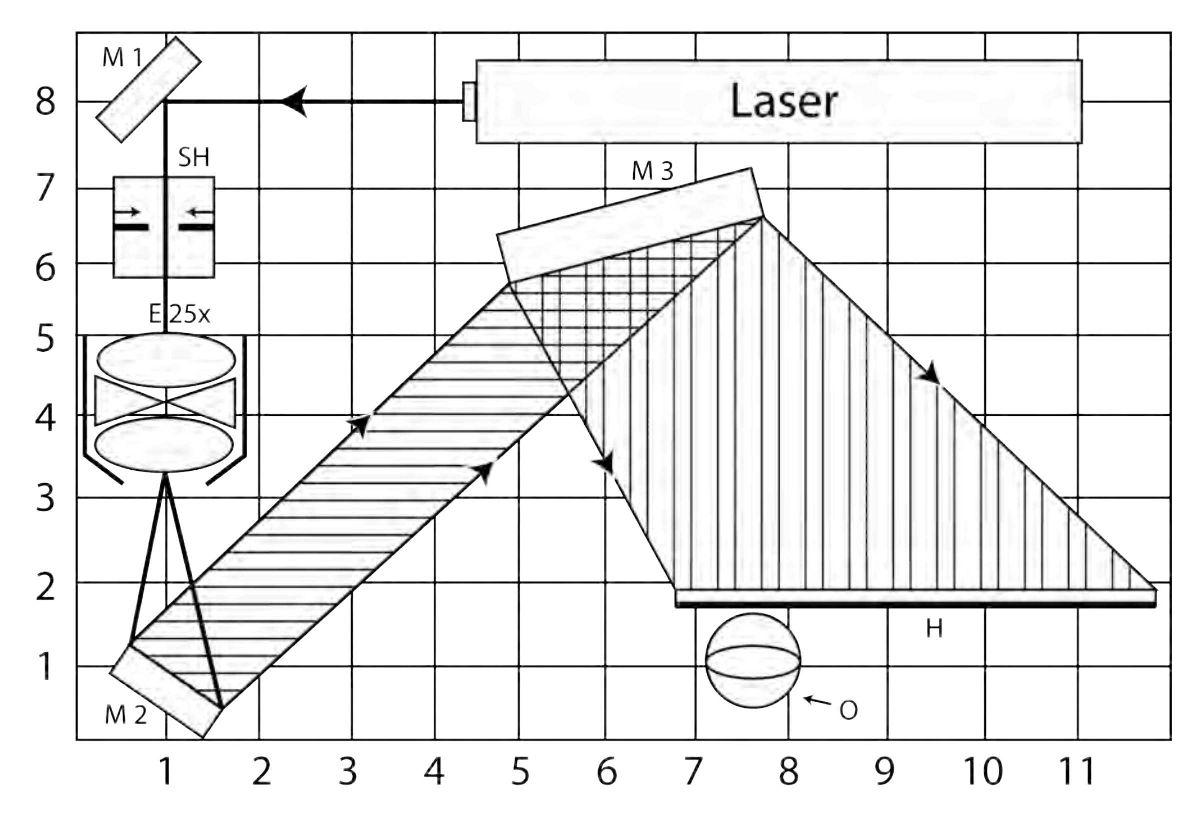


Fig. 20 Montage pour faire un hologramme par réflexion

7.6 Visualisation d'un hologramme par réflexion

Pour le voir, il suffit de mettre du papier noir derrière l'hologramme et de le regarder avec la lumière du soleil. Il faut orienter la plaque avec un angle semblable à celui de départ formé par le rayon laser et la plaque photo. Si cela ne fonctionne pas, retournez votre plaque photo, vous vous êtes peut-être trompé de côté. Si cela ne fonctionne toujours pas ou que le soleil est caché par des nuages, vous pouvez utiliser le flash de votre téléphone portable. Une fois que l'hologramme a pu être observé, vous pouvez coller le papier noir de manière définitive.

7.7 Remarques

Si vous utilisez des pellicules photos à la place des plaques photo, les temps d'exposition sont strictement identiques. Pour monter les films sur l'installation, insérez votre pellicule photo entre deux plaques de verre. Assurez-vous que les deux plaques soient propres pour ne pas interférer avec le laser. Utilisez des gants pour éviter toutes traces de doigts.

8 Résultats

A la fin de l'expérience on obtient ce fameux hologramme. Voici à quoi il ressemble :

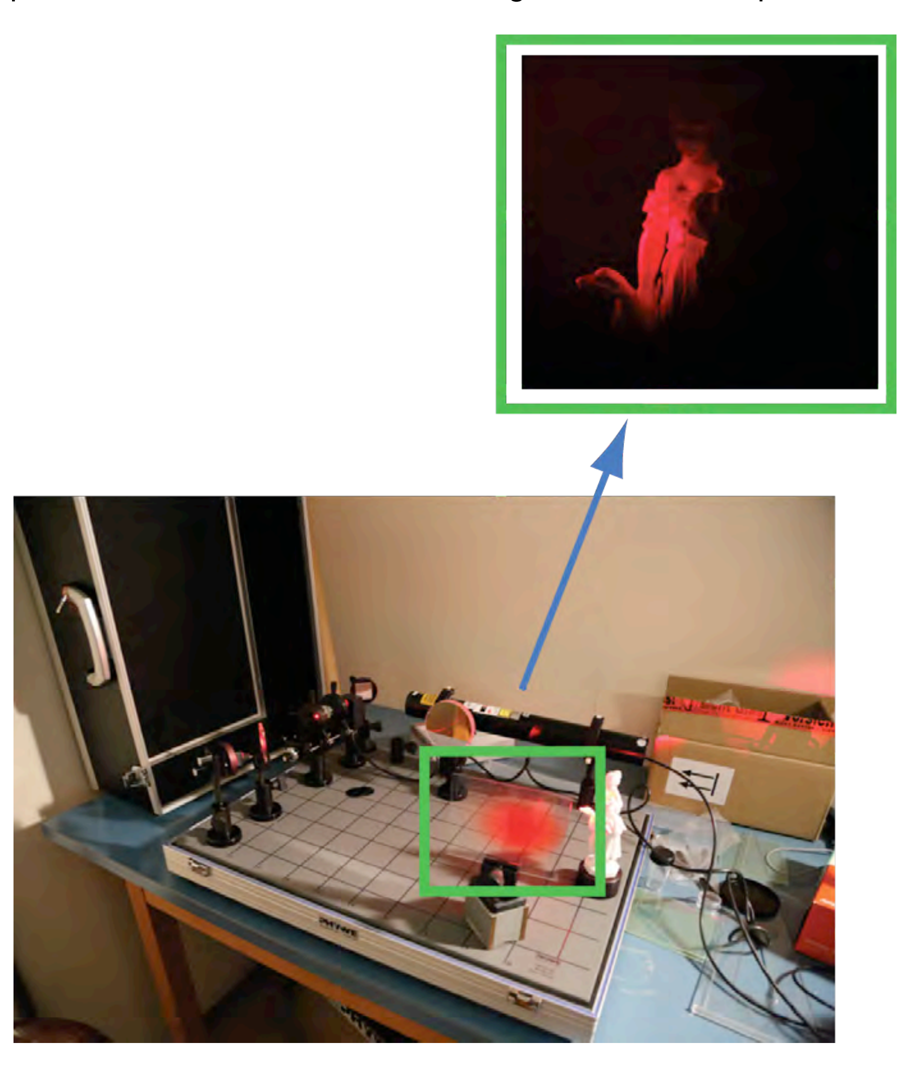
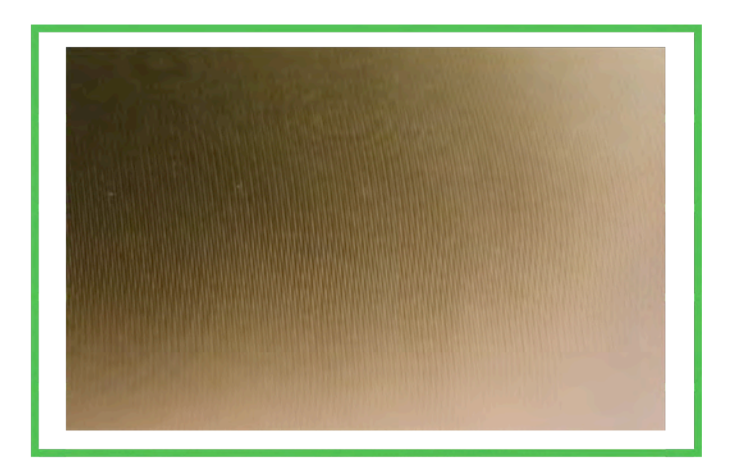


Fig. 21 Reconstruction hologramme

Bien sûr, le phénomène est beaucoup plus impressionnant en réalité. Cette illusion est due aux réseaux de diffraction contenus sur la plaque photo. Lors de l'enregistrement de l'hologramme, le faisceau objet et le faisceau de référence interfèrent sur la plaque qui contient des grains minuscules. On pourrait comparer ces derniers aux pixels contenus dans une photo numérique. Certains vont noircir sous l'influence de la lumière et d'autres vont rester transparents à cause de l'absence d'un rayon lumineux. Lorsque l'on projette le faisceau de référence sur la plaque photo, le réseau de diffraction va créer des interférences. La lumière va être plus ou moins déviée ou absorbée de façon à recréer la figure enregistrée sur la plaque photo. Une partie de ces réseaux est visible à l'oeil nu, mais la majeure partie est microscopique. Il y en a donc une grande partie que l'on ne peut pas voir. Il faut savoir qu'un millimètre de la plaque photo contient environ 70'000

grains. En reprenant l’exemple de la photo numérique et en sachant que les dimensions de la plaque sont 12x10 cm, une résolution d’environ 840 millions de pixels est alors obtenue. C’est une résolution 25 fois supérieure à celle des meilleurs appareils photos sur le marché (en 2013). En voici un exemple :



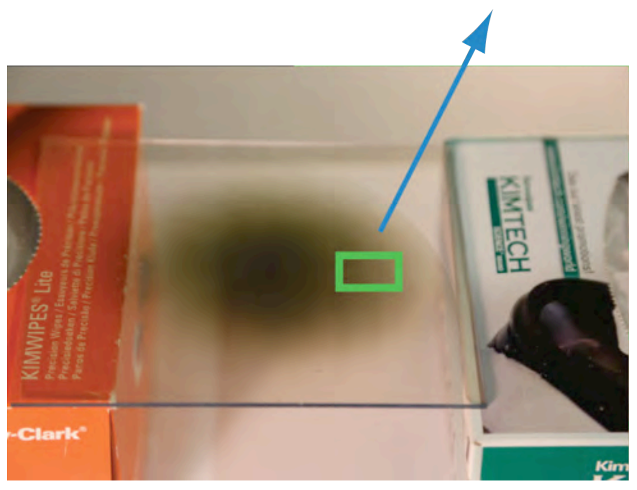


Fig. 22 Hologramme vu à l’oeil nu

C’est pour cela que l’holographie numérique reste très difficile. Elle demande une qualité trop élevée par rapport à ce qu’offre la technologie de nos jours.

Un autre type d’hologramme que j’ai créé est celui que l’on voit en lumière naturelle (réflexion). On peut le voir, par exemple, avec la lumière du soleil. Pour avoir un effet accru, j’ai trouvé une meilleure source lumineuse, la lumière blanche obtenue avec le flash de mon téléphone portable. En effet, le spectre de la lumière blanche contient toutes les couleurs, y compris celle dont on a besoin, le rouge. Le résultat est montré sur la figure 23.



Fig. 23 Hologramme visible en lumière naturelle

9 Conclusion

Ce travail a été utilisé pour l'installation et la mise en service d'un travail pratique avancé pour les étudiants de la section de physique à l'EPFL. Le mode d'emploi figurant dans ce dossier, fait partie de la notice donnée aux étudiants.
Ce travail m'a permis de découvrir des techniques de laboratoire sophistiquées, la photo traditionnelle, le laser et d'approfondir le cours d'optique. J'ai ainsi approché le monde de la recherche de l'EPFL.
J'ai eu énormément de plaisir à faire ce Travail de Maturité, même s'il y a eu des moments difficiles où j'ai douté du résultat final. Heureusement, avec un peu de persévérance, j'ai trouvé des solutions aux problèmes et des méthodes capables de garantir des résultats reproductibles.

10 Remerciements

Je remercie tout particulièrement M. Rosendo Sanjines, responsable des travaux pratiques avancés de physique à l'EPFL, de m'avoir accueilli dans son laboratoire et de m'avoir conseillé pendant tout mon travail. Je remercie également M. Vincent De Coulon qui m'a suivi avec patience et attention au cours de ce Travail de Maturité.

11 Bibliographie et liens internet

- DEFREITAS Frank, RHODY Alan, MICHAEL Steve, *Shoebox holography,* Berkley, California : Ross Books, 2000
- LEE Byoungho, « Three-dimensional display, past and present », *Physics today*, avril 2013, p. 36-41.
- UNTERSEHER Fred, HANSEN Jeannene, SCHLESINGER Bob, *Holography handbook,* Berkley, California : Ross Books, 1996
- VIÉNOT Jean-Charles, SMIGLIELSKI Paul, ROYER Henri, *Holographie optique*, Paris : Dunod, 1971
- HECHT Eugene, *Optique*, Paris : Pearson Education, 2005
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Holographie
- http://museeholographie.over-blog.com/5-categorie-332330.html
- http://www.espace-sciences.org/archives/science/20333-comment-ca-marche-90b6.html
- http://www.youtube.com/watch?v=UDxdq_ogqR8
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Daguerre
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Photographie_argentique
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Cohérence_(physique)
- http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M01_C01/co/Contenu_10.html
- http://en.wikipedia.org/wiki/Helium–neon_laser
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Laser

12 Sources des figures

- Titre : http://www.gizmodo.fr/2012/04/10/ce-que-serait-linterface-holographique-et-tactile-ultime.html
- Figure 1 : http://emmanuel.hourdequin.free.fr/bacstiaa_cours_tp_doc.htm
  Cours : Qu'est-ce que la lumière?
- Figure 2 : http://www.maxicours.com/soutien-scolaire/physique/terminale-s/200131.html
- Figure 3 : http://helpx.adobe.com/fr/audition/using/sound.html
- Figure 4 : http://helpx.adobe.com/fr/audition/using/sound.html
- Figure 5 : http://en.wikipedia.org/wiki/Helium-neon_laser
- Figure 6 : Hecht Eugene, *Physique*, Bruxelles : De Boeck, 2003
- Figure 7 : http://www.dsgentreprise.fr/manu/principe.html
- Figure 8 : http://fr.wikipedia.org/wiki/Diffraction_par_une_fente
- Figure 10 : http://my.opera.com/papyleblues/albums/showpic.dml?album=11854932&picture=154865882
- Figure 14 : HECHT Eugene, *Optique*, Paris : Pearson Education, 2005